

## 熱間圧延における作業ロール熱膨張プロファイルの予測と板材変形へ与える影響に関する研究

著者	成田 健次郎
号	2038
発行年	2002
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/10845">http://hdl.handle.net/10097/10845</a>

氏 名	なりた けんじろう 成 田 健次郎
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成14年10月9日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最 終 学 歴	昭和54年3月 東北大学大学院工学研究科機械工学第二専攻博士課程前期課程 修了
学 位 論 文 題 目	A Study on Method to Predict Thermal Profiles of Work Rolls and their Effects on Strip Deformation during Hot Rolling in Steel-making Dust and Polyvinyl Chloride (熱間圧延における作業ロール熱膨張プロファイルの予測と板材 変形に与える影響に関する研究)
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 進藤 裕英 東北大学教授 池田 圭介 東北大学教授 伊藤 耿一 東北大学教授

## 論 文 内 容 要 旨

### 第1章 序論

鉄鋼材料は大部分が熱間圧延加工を経て板材、条材や管材などに成形されるが、圧延加工される鉄鋼製品の半分以上を占めているのが板材であり、鋼板の製造において熱間圧延技術は大きな役割を担っている。昭和40年頃以降プロセスコンピュータの導入などにより、圧延材の平坦度形状制御、板クラウン制御などの新技術や、新型圧延機が次々と開発されるなど圧延技術は著しい発展を遂げるようになってきている。このような状況を経て近年においては板材品質に対する要求が益々高まっており、特に板厚分布、平坦度形状などの幾何学的精度向上が強く求められるようになってきている。図1に圧延機とロール変形の模式図を示す。板材品質に影響を与える因子としては圧延圧力により生じる作業ロールの曲げ変形や表面の偏平、板材との接触により生じる作業ロール表面の熱膨張や摩耗などがある。これら作業ロール軸の撓みや表面の変形プロファイルが足し合わせられて構成される作業ロールの隙間形状が板材に転写され品質を左右する。作業ロールの軸方向の熱膨張量分布(熱膨張プロファイルと称す)は時間経過とともに刻々変化する。特に熱間圧延においては千度前後の高温板材と接触するため、作業ロールへの入熱が大きく、熱膨張プロファイルの板へ与える影響も大きなものとなる。

熱膨張プロファイルに関する従来の検討例ではロールへの入熱と冷却を平均化するの普通であり、ロール冷却に用いるノズルの適切な配置や圧延条件の影響を直接的には考慮できていない。また、用いられた計算モデルはオフライン解析を想定した複雑なものでオンライン用予測モデルとして適さないため、実際の圧延制御に予測モデルを反映させることは難しかった。本研究はこのような状況において、熱間圧延における板材の品質確保、安定圧延の維持および圧延機制御性の向上に寄与する観点から、熱膨張プロファイルの予測法、ならびに圧延材の3次元変形の予測方法について行ったものである。

熱膨張プロファイルの予測に関する研究では、まず、スプレー水の冷却特性を実験により調べ、熱膨

張に与える影響の把握を可能とした。さらに、板の幅変更や従来にない作業ロールの軸方向移動の影響などを考慮できる熱膨張プロフィール予測用の制御数式モデルを解析的に導出し、実機実験結果との比較によりその有効性を確認した。一方、圧延の3次元変形解析においては、剛塑性有限要素法を適用し、新たに接触解析手法および板の弾性効果を近似的に解析に取り込む手法を提案し、有効性を実験的に確認した。作業ロールの熱膨張プロフィール、弾性変形を予測し、圧延板材へ及ぼす影響を明らかにし、板材の安定的な品質確保及び圧延機制御性の向上に寄与した。

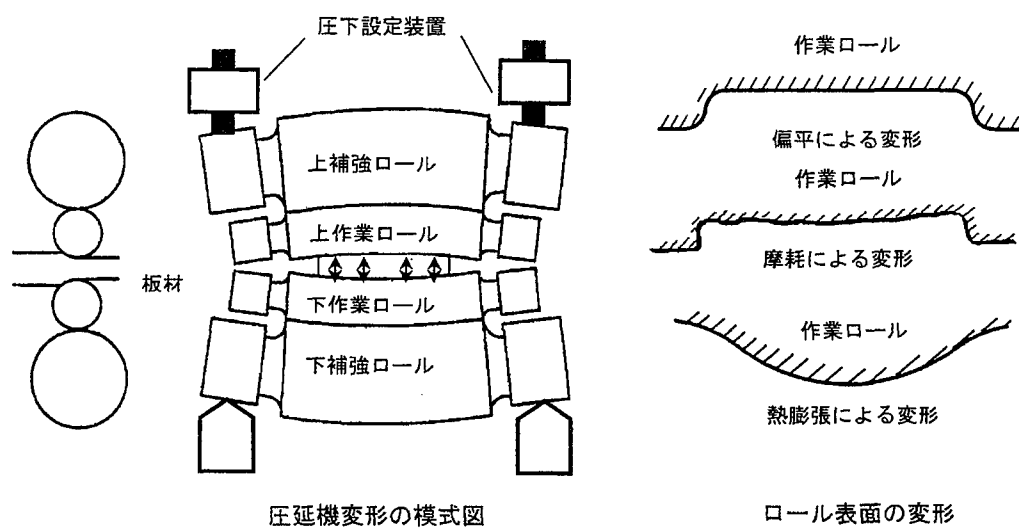


図1 圧延機とロール変形の模式図

第2章 実圧延条件を考慮した作業ロール温度予測方法に関する理論的検討

本章では実圧延の冷却条件を解析に取り入れる方法について検討し、作業ロール1回転の周期的な熱的条件を考慮できる影響マトリックスを用いる新たな1次元非定常温度計算方法を提案した。提案したロール温度解析手法により計算時間の長短について検討し、通常の有限要素法と比較して回転数が多いほど高速計算効果は大きく、短時間で解析できることを示した。ロールと板材の接触を考慮した熱間板圧延について、ロール表面温度が外観上飽和しても、ロールの熱膨張量は増加し続けることを示した。

第3章 衝突噴流による作業ロール冷却特性に関する実験的研究

本章ではほぼ実機ロール寸法の伝熱面を用いた大規模実験を行い、ロール表面の局所熱伝達率および平均熱伝達率を求め、これらの実験式を用いて温度解析を行い冷却特性を評価した。また、圧延ロールの冷却評価を行うため、スプレーノズルの水力特性および衝突噴流による熱伝達特性の実験を行った結果、次の事項が明らかとなった。

- a) 単一スプレー水の場合、スプレー水の流量分布と同様に局所熱伝達率はスプレー水中心部で最大をもつ形に分布する。平均熱伝達率は冷却水量密度に強く依存する。
- b) 2本のスプレー水の水膜干渉領域内では、中心部の局所熱伝達率が大きく、冷却水量密度の増加により冷却性能は向上する。
- c) マルチスプレー水の冷却性能はノズル配置、高さ、仕様によらず冷却水量密度に比例して向

上し、ノズルの高密度配置、冷却水の流量増加により十分な冷却性能が得られる。

#### 第4章 作業ロール熱膨張プロファイルの簡易計算法に関する理論的研究

本章では熱膨張プロファイル（サーマルクラウン）をより簡便に計算できる手法を開発し、オンライン予測制御を可能とすることを目的としている。近似解析手法の一つである積分法（プロファイル法）を非定常熱伝導方程式に適用し、熱膨張プロファイル予測モデルを簡単な数式の形で導いた。本簡易モデルと軸対称温度分布の仮定を用いた有限要素法の計算値を比較した結果、熱膨張プロファイルの形は良く一致した。熱膨張プロファイルを予測する簡易数式モデルにロール内部温度分布の影響を表す項を付加し、数式により簡便に汎用的に計算する方法を提案した。本計算方法と有限要素法の計算値を比較した結果、ロール熱膨張量及び熱膨張プロファイルは良く一致した。

#### 5章 実用熱間圧延におけるサーマルクラウン予測の適用例

本章では、熱間圧延のオンライン適用を可能とするため、第4章と類似な数式を導き、これを基に過去の圧延履歴や板幅変更、さらに作業ロール軸方向移動の影響を考慮できるオンライン用サーマルクラウン予測モデルを開発した。開発した予測モデルを用いてサーマルクラウンのシミュレーション計算を行い、実測による熱膨張プロファイルと比較した。その結果、同一幅圧延、幅変更圧延のいずれの場合も計算値と実測値は良く一致した。また、本予測モデルにより、サーマルクラウンへ及ぼす板幅の影響、板幅変更の影響、作業ロールの軸方向移動（作業ロールシフト）の効果などの基本的な特性について検討した結果、次のことが明らかになった。

a) サーマルクラウンは圧延開始直後に急増し、その後漸増し、一定値に飽和する。サーマルクラウンの飽和値は、板幅が広くなると大きくなる。サーマルクラウンは幅替え直後に大幅に変化（広幅から狭幅の場合は減少、狭幅から広幅の場合は増加）し、その後一定値（幅替え後のサーマルクラウンの飽和値）に漸近する。

b) 作業ロールシフトによりサーマルクラウンは周期的に変化し、最大シフト時に最小となる。シフトストロークを大きくすることにより、サーマルクラウンの値は小さくなる。

#### 第6章 作業ロールと圧延材の接触変形に関する理論的研究

本章では弾性有限要素法を用いて作業ロール表面の変形特性を調べ、修正半無限体の偏平式の有効性について検討した。その結果、有限要素法と修正半無限体式の予測変位量は比較的良く合った。しかし、3次元状態を平面ひずみ条件で補正したことによると思われる誤差が認められ、ロール偏平が大きいような高圧下圧延では板クラウンを小さ目に見積もる可能性があることがわかった。

作業ロールを弾性体・板材を剛塑性体とし、接触条件を有限要素解析に取り込む手法として、作業ロール表面上に移動可能な接触境界節点を設け、接触領域を可変とする接触解析法を独自に開発し、その具体的な計算方法を提示した。さらに、本方法を用いて接触境界移動の効果について検討した。その結果、本接触境界移動解析法を用いることによりロール偏平による接触長変化の予測が可能となることが確認できた。また、流線変化を考慮せずに従来手法と同じ境界条件を用いた場合には接触長、荷重ともに従来予測値と近い値となった。

#### 第7章 板厚分布へ及ぼす作業ロールプロファイルの影響に関する理論的研究

本章では、作業ロールから板へのプロファイル転写の機構を考察するため、張力フィードバック拘束条

件を剛塑性有限要素解析に取り込む手法について検討し、幅方向の板速度分布と伸び差率の関係式を得た。得られた式を用いて剛塑性有限要素解析において幅方向の板速度偏差に対応して拘束力を生じる解析モデルを開発した。熱間板材圧延を模擬するため、作業ロールに熱膨張プロファイルを想定したロールプロファイルを設けてアルミ板材圧延実験を行った。解析モデルを用いて計算を行い実験値と比較した結果、計算と測定による板プロファイルは良く一致した。実圧延における熱膨張プロファイルの影響を調べるため、同一幅圧延、板幅変更時、作業ロールシフト時を取り上げ、開発した解析モデルを用いて板プロファイルへ与える影響について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

a) 熱膨張プロファイルの影響は特に板端部近傍に現れ、熱膨張量が大きくなると板端部近傍の板厚が増加する傾向がある。

b) 広幅から狭幅に板幅変更する場合には板端部近傍の板厚は徐々に減少する。逆に狭幅から広幅に板幅変更する場合には板端部近傍の板厚は徐々に増加する。

c) 作業ロールシフトを行った場合には板端部近傍の板厚は徐々に変化し、作業ロールシフト変化の板プロファイルに与える影響は少ない。

## 第8章 結 論

本章では、各章において述べた内容をそれぞれ概括し、得られた知見を整理して本論文の統括とした。

## 論文審査結果の要旨及び学力確認結果の要旨

論文提出者氏名	成田 健次郎
論文題目	熱間圧延における作業ロール熱膨張プロファイルの予測と板材変形へ与える影響に関する研究
審査委員及び 学力確認担当者	主査 教授 進藤裕英      教授 池田 圭介 教授 伊藤耿一

### 論文審査結果の要旨

本論文は、熱間圧延における板材の品質確保、安定圧延の維持および圧延機制御性の向上に寄与する観点から、板材と直接接する作業ロールに生じる熱膨張プロファイルの予測方法および圧延材の3次元変形の予測方法に関する理論的・実験的研究成果をまとめたもので、全編8章から成る。

第1章の序論では、板圧延における研究課題と圧延機が開発されてきた背景と動向および本研究で対象とした熱膨張プロファイルの予測と板材変形に与える影響についてその位置付けを述べるとともに、本研究の目的と意義を明らかにしている。

第2章では、実圧延の冷却条件を解析に取り入れる方法について検討し、作業ロール1回転の周期的な熱的条件を考慮できる温度計算方法を確立することに成功している。また、熱間圧延について解析を行い、ロール温度とロールの熱膨張挙動について詳細な考察を加えている。

第3章では、実機ロール寸法の伝熱面を用いた大規模実験を行い、ロール表面の局所熱伝達率および平均熱伝達率を求め、スプレーノズルの水力特性および衝突噴流による熱伝達特性を明らかにしている。また、これらの実験式を用いて温度解析を行い圧延における冷却特性について詳細な考察を加えている。

第4章は、熱膨張プロファイルの予測をオンライン制御に取り込むため、積分法を非定常熱伝導方程式に適用して解を簡単な数式の形で導き、また、軸対称温度分布の影響を表す項を付加し、簡便な数式予測モデルを確立することに成功している。そして、有限要素法との比較により、本方法による熱膨張プロファイル予測の妥当性を明らかにしている。

第5章は、第4章と類似な数式を導き、実機実測値との比較を行い、オンライン使用の予測モデルを開発することに成功している。また、本予測モデルにより、熱膨張プロファイルへ及ぼす板幅の影響、板幅変更の影響、作業ロールの軸方向移動による効果などの基本的な特性を明らかにしている。

第6章は、板材変形の理論的予測を可能にするため、作業ロールを弾性体、板材を剛塑性体とし、接触領域を可変とする接触解析法を独自に開発して従来手法との比較を行い、予測の妥当性を明らかにしている。

第7章は、作業ロールから板へのプロファイル転写の機構を考察し、剛塑性有限要素解析に張力フィードバック拘束条件を取り込むための手法を確立することに成功している。また、熱膨張プロファイルの影響を調べるため、開発した解析モデルを用いて板プロファイルへ与える影響について詳細に検討している。

第8章の結論では、各章において述べた内容をそれぞれ概括するとともに、得られた知見を整理して、本論文の統括としている。

以上要するに、本研究は、熱間圧延において作業ロールに生じる熱膨張プロファイルの予測法と板材変形へ与える影響について理論的・実験的に明らかにし、板材の安定圧延・品質確保さらには制御性向上に資する結果を提供したもので、材料加工プロセス学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

### 学力確認結果の要旨

平成14年7月15日、審査委員ならびに関係教官出席のもとに、学力確認のための試問を行った結果、本人は材料加工プロセス学に関する十分な学力と研究指導能力を有することを確認した。

なお、英学術論文に対する理解力よりみて、外国語に対する学力も十分であることを認めた。

## 審査結果の要旨

本論文は、熱間圧延における板材の品質確保、安定圧延の維持および圧延機制御性の向上に寄与する観点から、板材と直接接触する作業ロールに生じる熱膨張プロファイルの予測方法および圧延材の3次元変形の予測方法に関する理論的・実験的研究成果をまとめたもので、全編8章から成る。

第1章の序論では、板圧延における研究課題と圧延機が開発されてきた背景と動向および本研究で対象とした熱膨張プロファイルの予測と板材変形に与える影響についてその位置付けを述べるとともに、本研究の目的と意義を明らかにしている。

第2章では、実圧延の冷却条件を解析に取り入れる方法について検討し、作業ロール1回転の周期的な熱的条件を考慮できる温度計算方法を確立することに成功している。また、熱間圧延について解析を行い、ロール温度とロールの熱膨張挙動について詳細な考察を加えている。

第3章では、実機ロール寸法の伝熱面を用いた大規模実験を行い、ロール表面の局所熱伝達率および平均熱伝達率を求め、スプレーノズルの水力特性および衝突噴流による熱伝達特性を明らかにしている。また、これらの実験式を用いて温度解析を行い圧延における冷却特性について詳細な考察を加えている。

第4章は、熱膨張プロファイルの予測をオンライン制御に取り込むため、積分法を非定常熱伝導方程式に適用して解を簡単な数式の形で導き、また、軸対称温度分布の影響を表す項を付加し、簡便な数式予測モデルを確立することに成功している。そして、有限要素法との比較により、本方法による熱膨張プロファイル予測の妥当性を明らかにしている。

第5章は、第4章と類似な数式を導き、実機実測値との比較を行い、オンライン使用の予測モデルを開発することに成功している。また、本予測モデルにより、熱膨張プロファイルへ及ぼす板幅の影響、板幅変更の影響、作業ロールの軸方向移動による効果などの基本的な特性を明らかにしている。

第6章は、板材変形の理論的予測を可能にするため、作業ロールを弾性体、板材を剛塑性体とし、接触領域を変変とする接触解析法を独自に開発して従来手法との比較を行い、予測の妥当性を明らかにしている。

第7章は、作業ロールから板へのプロファイル転写の機構を考察し、剛塑性有限要素解析に張力フィードバック拘束条件を取り込むための手法を確立することに成功している。また、熱膨張プロファイルの影響を調べるため、開発した解析モデルを用いて板プロファイルへ与える影響について詳細に検討している。

第8章の結論では、各章において述べた内容をそれぞれ概括するとともに、得られた知見を整理して、本論文の統括としている。

以上要するに、本研究は、熱間圧延において作業ロールに生じる熱膨張プロファイルの予測法と板材変形へ与える影響について理論的・実験的に明らかにし、板材の安定圧延・品質確保さらには制御性向上に資する結果を提供したもので、材料加工プロセス学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。